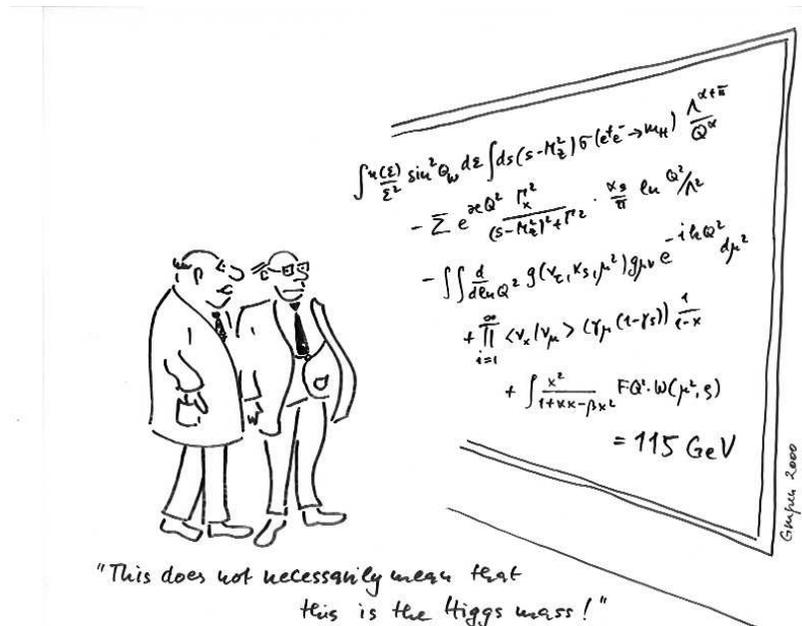




Das Higgs-Boson - ein Konzept zur Massenerzeugung



Richard Nisius
MPI München
nisius@mppmu.mpg.de



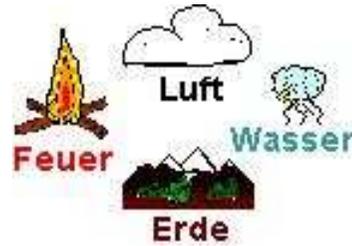
Was Sie in der nächsten Stunde erwartet

- **Einleitung**
- **Das Higgs-Boson im Standardmodell (SM)**
- **Die Higgs-Suche bis heute**
 - 1) **Was haben wir von LEP gelernt?**
 - 2) **Was hat das Tevatron beigetragen?**
- **Die Higgs-'Messungen' in der Zukunft**
 - 1) **Was haben wir vom Run II am Tevatron zu erwarten?**
 - 2) **Das Entdeckungspotential des Large Hadron Colliders (LHC)**
 - 3) **Was bringt ein zukünftiger Linearbeschleuniger (LC)?**
- **Zusammenfassung und Ausblick**



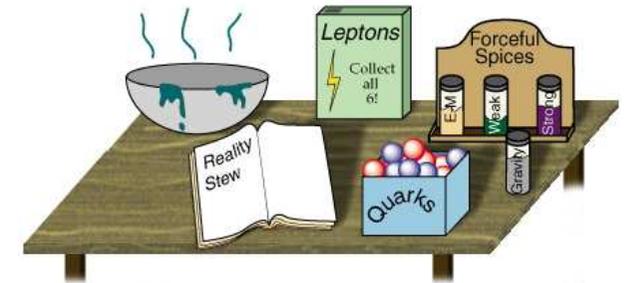
Was haben wir herausgefunden

Es war ein langer Weg von den vier Elementen...



400 v.Chr.

bis zum heutigen (2000++) Bild des...



Kochrezepts der Natur.

Der Stand der Dinge

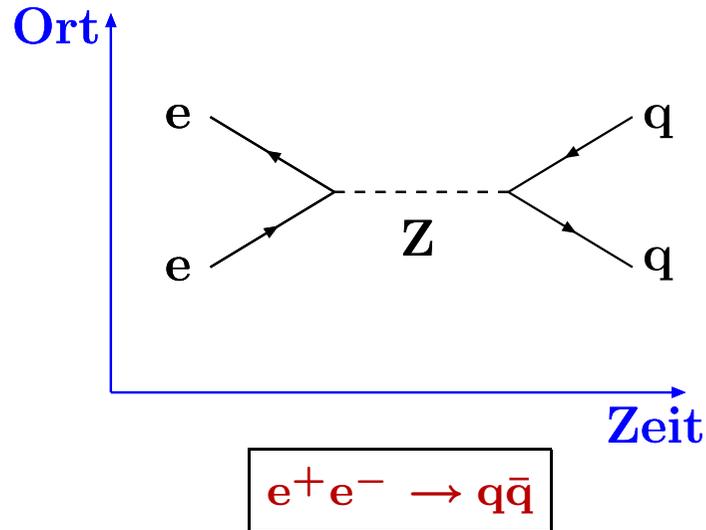
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie.
- Zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von etwa 0 für Neutrinos bis 175 GeV (Atom mit $A = 183$) für das top Quark.
- Die Wechselwirkungen der Fermionen werden durch den Austausch von Bosonen (Spin = 1,2) beschrieben.

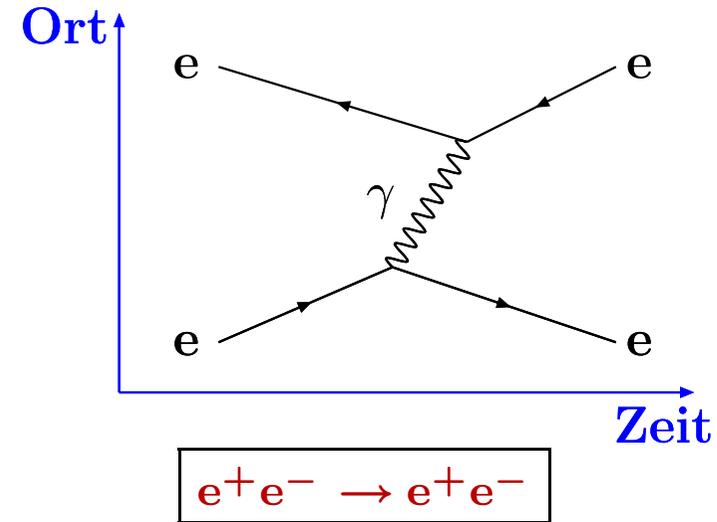


Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



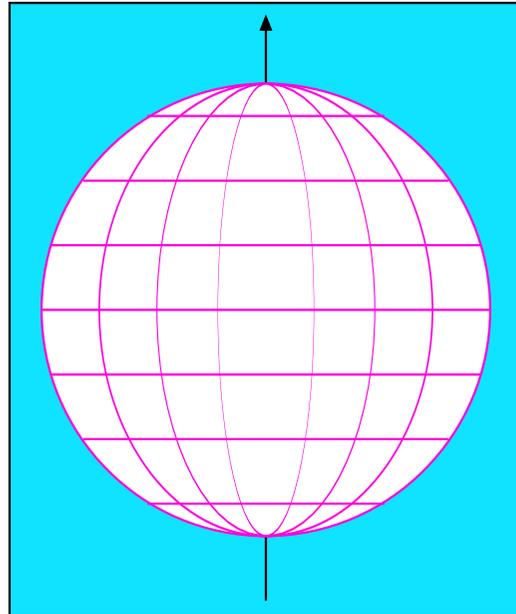
Das mathematische Konzept

- Eichgruppe: $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ mit lokaler Eichinvarianz.
- Eichbosonen: γ, Z, W^\pm (elektroschwach) und Gluonen (stark).
- Ladungen: elektrische Ladung, schwacher Isospin und Farbe.
- Die Bosonen, die Ladungen tragen, haben Selbstwechselwirkungen: Z, W (elektroschwach) und Gluonen (stark).

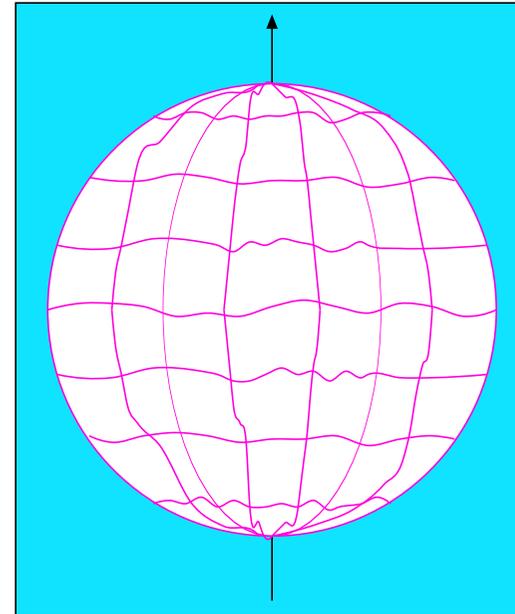


Eichtransformationen freier Felder

Global: $\Phi' = e^{i\alpha} \Phi$



Lokal: $\Phi' = e^{i\alpha(x)} \Phi$



Invarianz \Rightarrow

Ladungserhaltung

Wechselwirkung mit Photonfeld

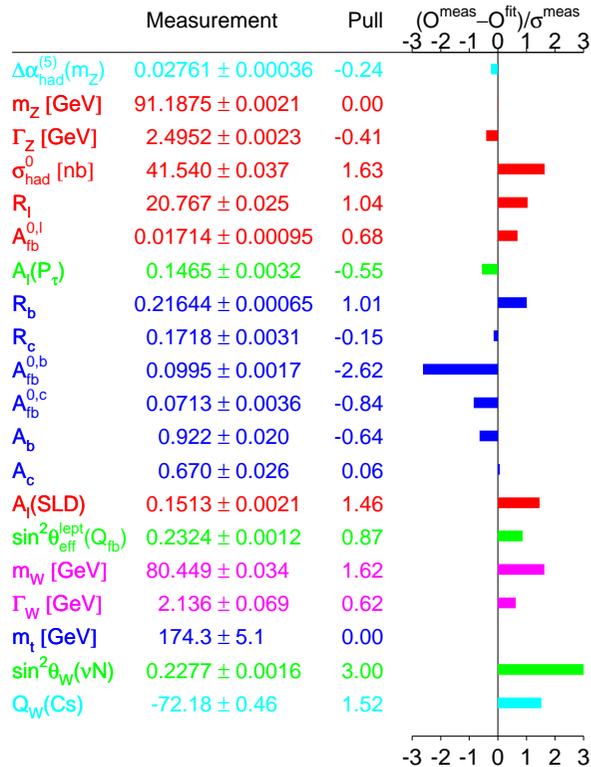
Die Forderung nach lokaler Eichinvarianz erzwingt ein masseloses Eichboson.



Das Standardmodell ist präzise getestet worden

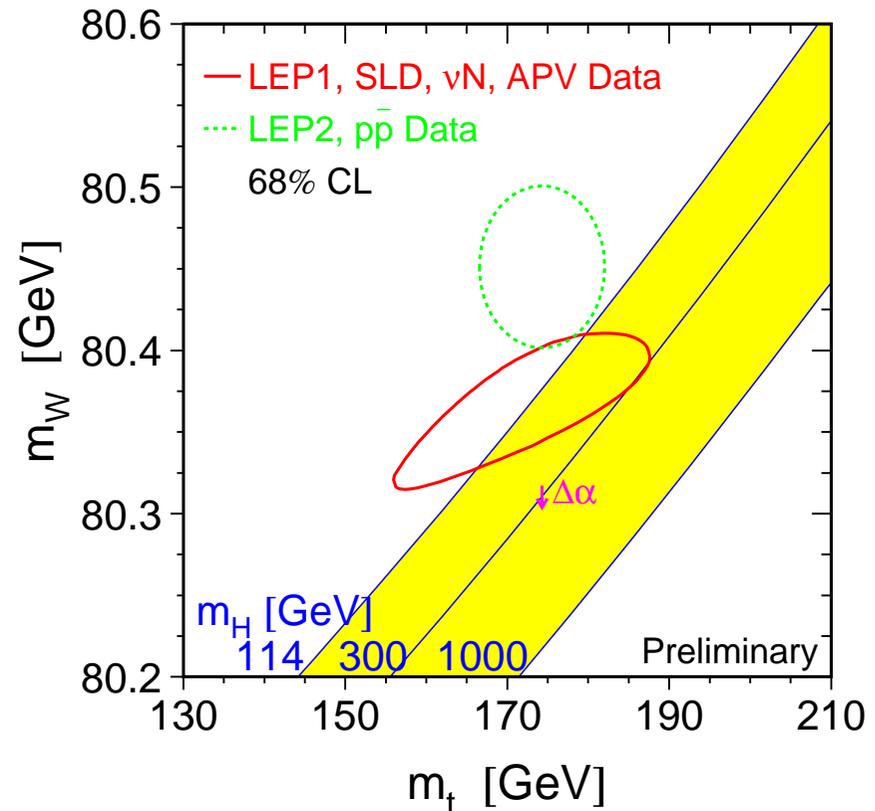
Die SM Parameter

Summer 2002



Bestätigung mit einer Präzision besser als 1 Promille.

m_W und m_{top}



Konsistenz zwischen direkten und indirekten Messungen.



Was wollen wir denn noch?

Es gibt ein paar fundamentale Probleme

- Die lokale Eichinvarianz funktioniert nur für masselose Eichbosonen, also nur für Photonen und Gluonen, aber nicht für W und Z-Bosonen!
- Der Wirkungsquerschnitt longitudinaler Bosonen divergiert für hohe Energien.

$$\sigma \left(\left[\begin{array}{c} W_L^+ \text{---} \\ W_L^- \text{---} \end{array} \right] \begin{array}{c} \text{---} Z/\gamma \text{---} \\ \text{---} Z/\gamma \text{---} \end{array} \left[\begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} W_L^- \\ W_L^+ \end{array} \right] \begin{array}{c} \text{---} Z/\gamma \text{---} \\ \text{---} Z/\gamma \text{---} \end{array} \left[\begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \right] \right) \sim s$$

- ...
- Wir wollen verstehen was die Massen erzeugt.

Wir brauchen eine Lösung für diese Schwächen des Standardmodells.



Eine Lösung - das Higgs Boson

Die Vermutung (1965)

- Fundamentale Teilchen, sowohl Fermionen als auch Bosonen, sind an sich masselos.
- Massen werden erst durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem Higgsfeld, erzeugt.
- Je stärker die Kopplung um so größer die Masse.
- Die Eichbosonen erhalten ihre longitudinalen Anteile durch spontane Symmetriebrechung.

Die Konsequenz

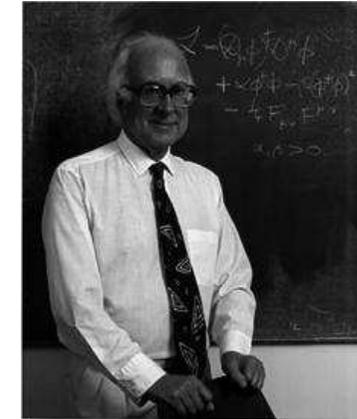
- Die Existenz des skalaren Higgs-Bosons als Anregung des Higgsfeldes.

Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des Higgs-Bosons an alle Teilchen sind vorhergesagt.
- Die Zerfalls-Kanäle und Raten des Higgs-Bosons bei gegebener Masse liegen fest.

Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt und muß gemessen werden.

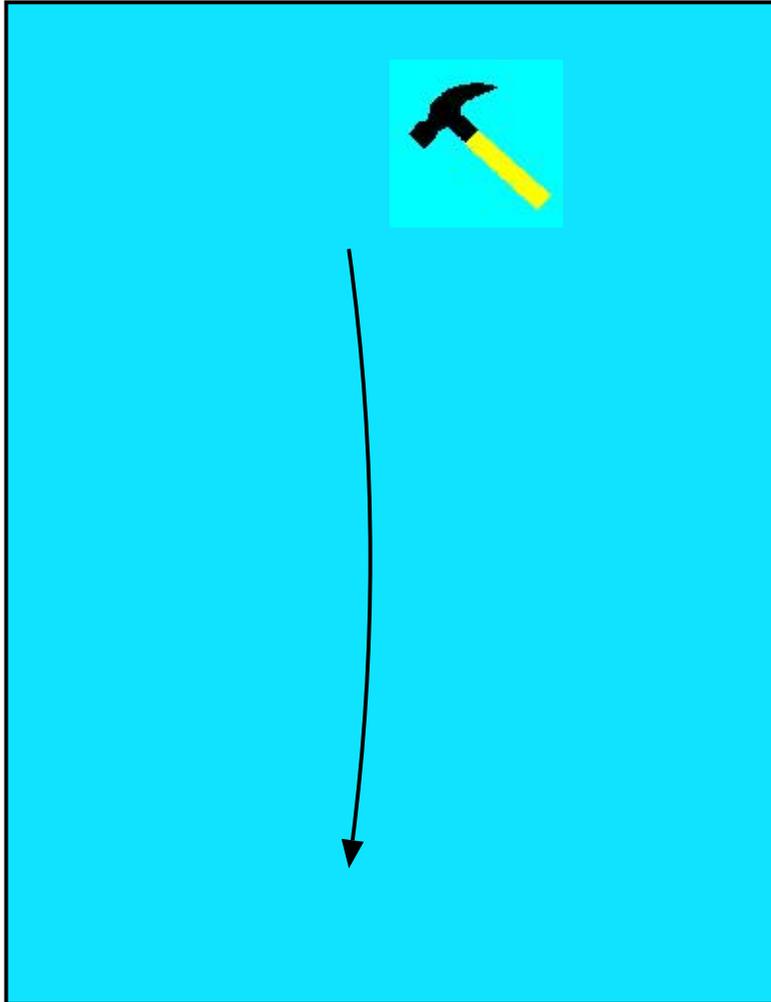
Der Vater des Gedankens



Peter Higgs



Spontane Symmetriebrechung - ein Beispiel



- Ein rotationssymmetrisches System.
- Ob nun so oder so, der neue Grundzustand hat nicht mehr die Symmetrie des Systems
 \Leftrightarrow **spontane Symmetriebrechung.**
- **Goldstone Theorem:**
Immer wenn eine kontinuierliche Symmetrie eines Systems im Grundzustand nicht realisiert ist, treten masselose skalare Teilchen, die Goldstone-Bosonen, auf.
- **Higgs-Mechanismus:**
Diese masselosen Goldstone-Bosonen können durch eine Eichtransformation in die longitudinalen Freiheitsgrade der Eichbosonen umgewandelt werden. Man sagt dazu auch:
'Das Goldstone Boson wird vom Eichboson gefressen.'

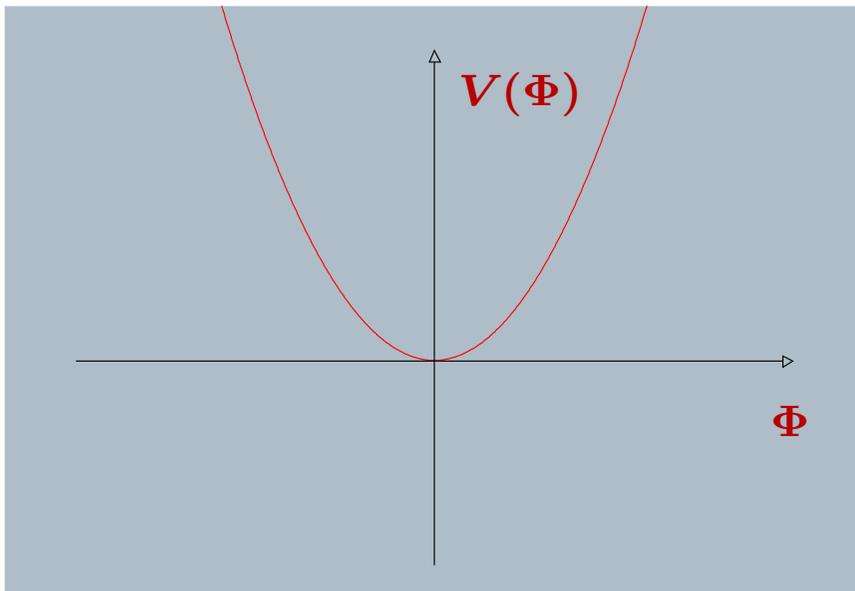


Symmetriebrechung und Higgs Potential

$$V(\Phi) = -\frac{1}{2}|\mu^2|\Phi^2 + \frac{1}{4}|\lambda|\Phi^4$$

Symmetrie

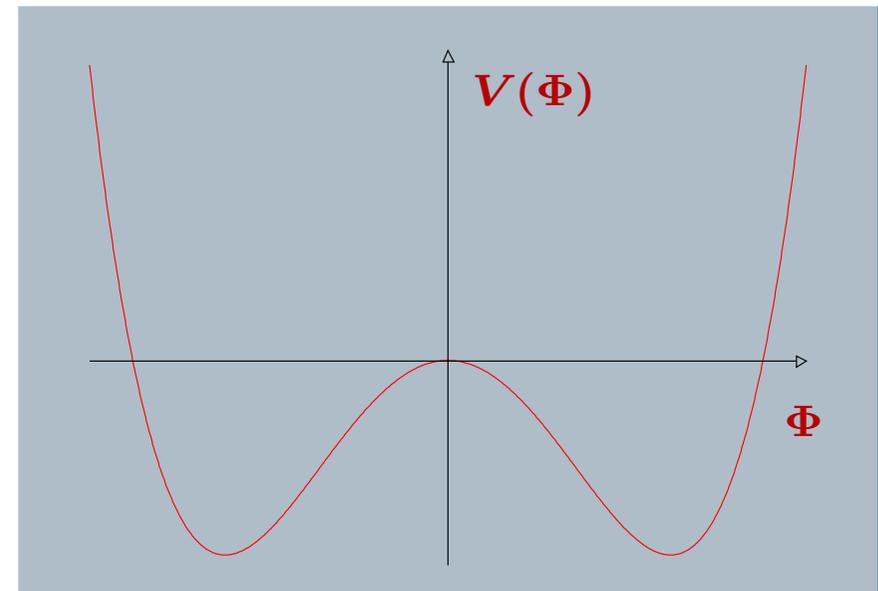
$$|\mu^2| = -M_H^2, \lambda = 0$$



$$V_{\min}(\Phi) = V(0) = 0$$

Symmetriebrechung

$$\mu^2 = M_H^2/2, \lambda = \frac{M_H^2}{v^2}$$



$$V_{\min}(\Phi) = V\left(\frac{v}{\sqrt{2}}\right) = \frac{-M_H^2}{16v^2}$$

Die Störungstheorie ist eine Entwicklung um das Minimum des Potentials.



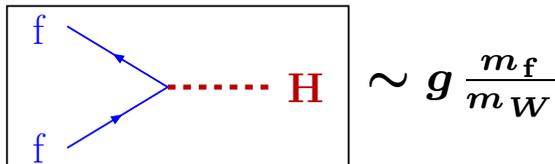
Das Higgs-Boson im Standardmodell

Das Higgs-Feld

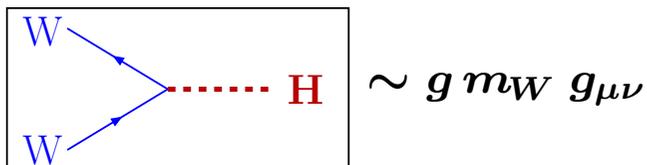
- Skalares komplexes Dublett $\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}$.
- Drei der vier Freiheitsgrade ergeben die longitudinalen Freiheitsgrade der W^\pm und Z-Bosonen, der vierte Freiheitsgrad liefert das skalare Higgs-Boson.

Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- Die Yukawa Kopplung an Fermionen:

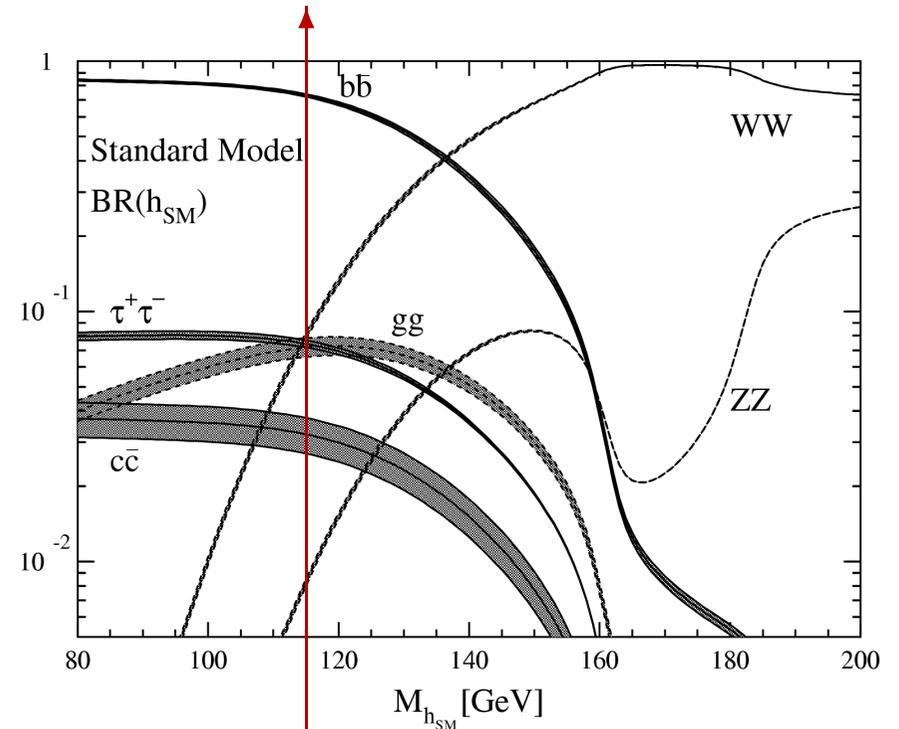


- Die Kopplung an W-Bosonen:



Die Zerfallsbreiten

$$M_H = 115 \text{ GeV}$$



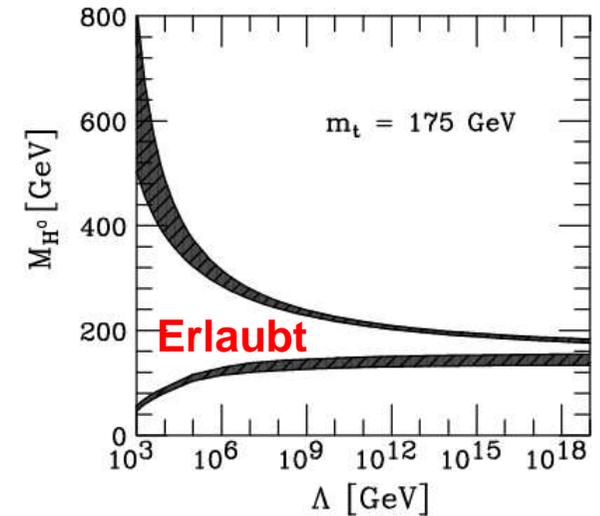
- 74% ($H \rightarrow b\bar{b}$)
- 7% ($H \rightarrow \tau^+ \tau^- , W^+ W^- , gg$)
- 4% ($H \rightarrow c\bar{c}$)



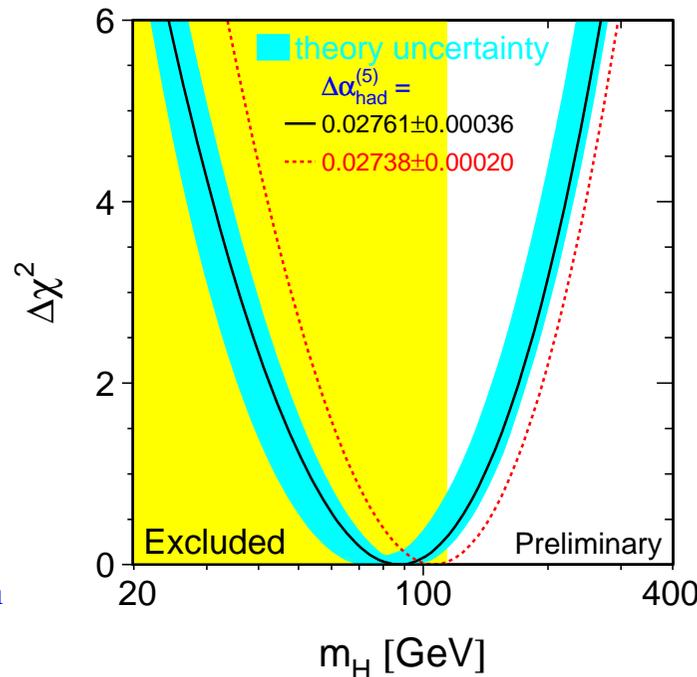
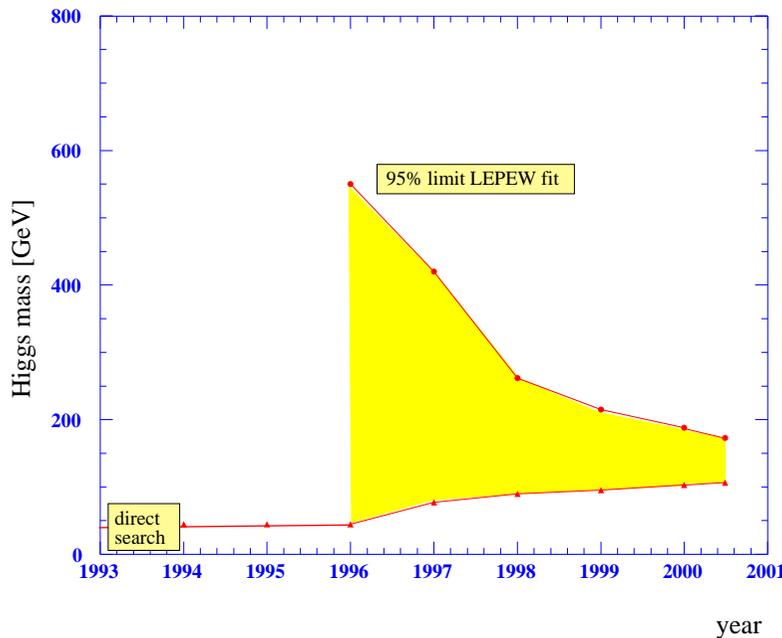
Wo müssen wir nach dem Higgs-Boson suchen?

Das Resultat langer Evolutions...

- Rechnung für $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}$, $\alpha_s(m_Z^2) = 0.118$.
- Λ ist die Skala bis zu der das SM gültig bleibt.
- Forderung der Perturbativität \Rightarrow Obere Grenze.
- Stabilität des Vakuums \Rightarrow Untere Grenze.



...und langer Bemühungen

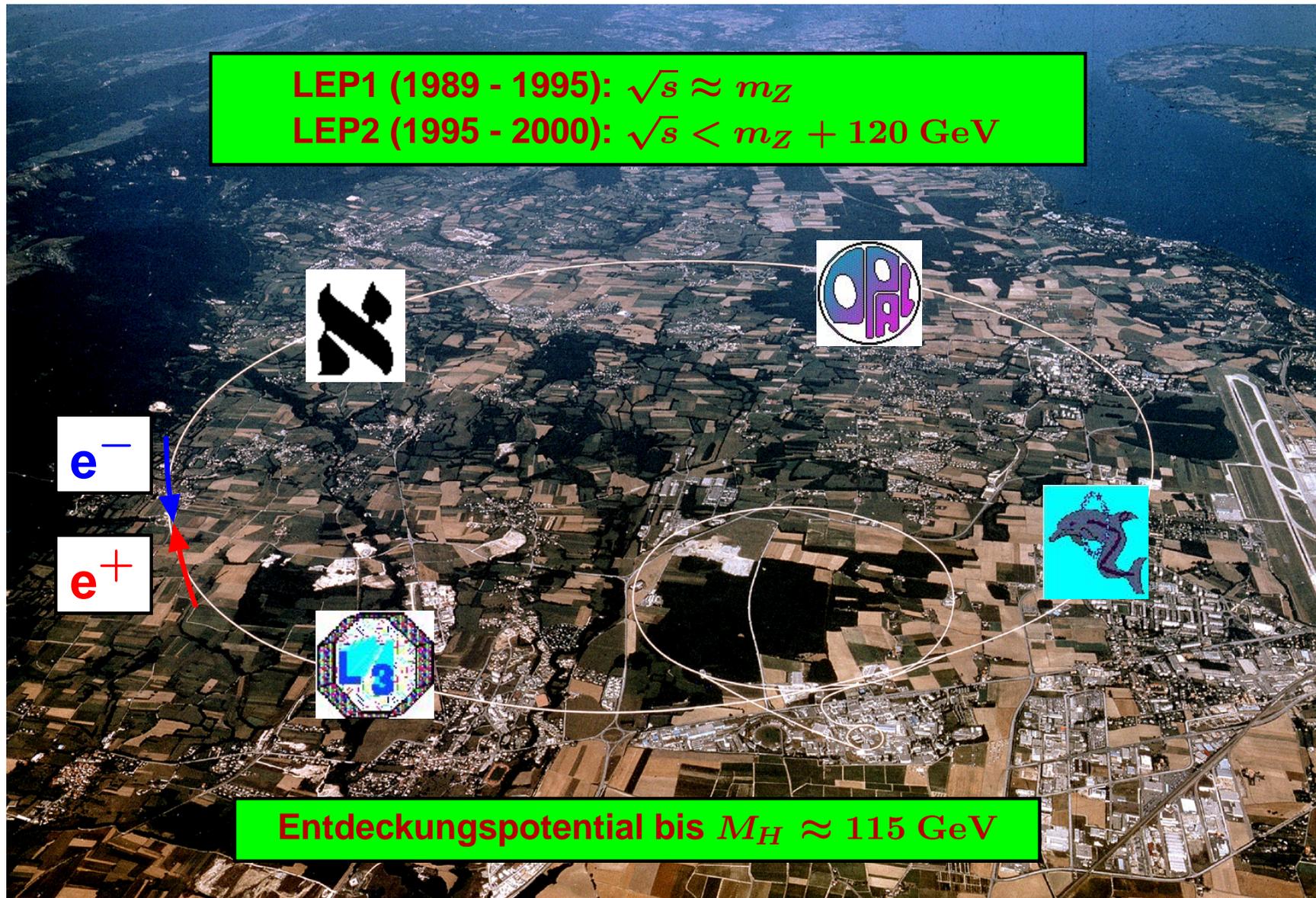


Der beste Fit

- $M_H = 81_{-33}^{+52} \text{ GeV}$
- $M_H < \mathcal{O}(200) \text{ GeV}$ mit 95% CL



Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

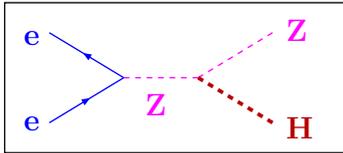




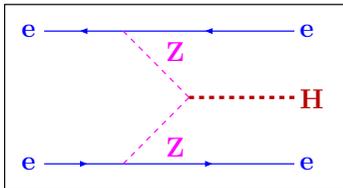
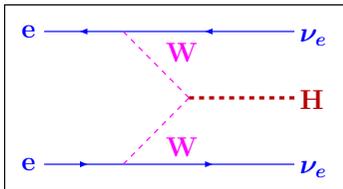
Higgs-Suche bei LEP - generelle Überlegungen

Produktion

● Higgs-Strahlung



● Boson-Fusion



Higgs-Strahlung ist der bei weitem dominierende Prozess bei LEP.

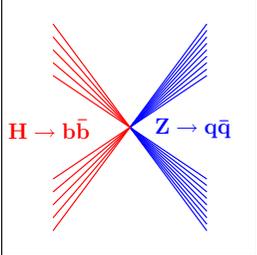
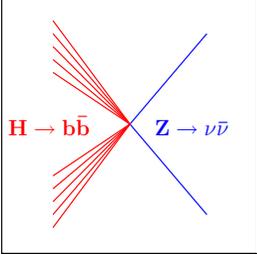
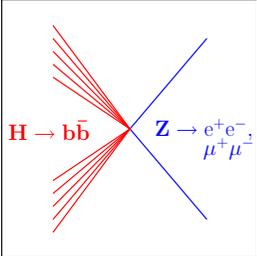
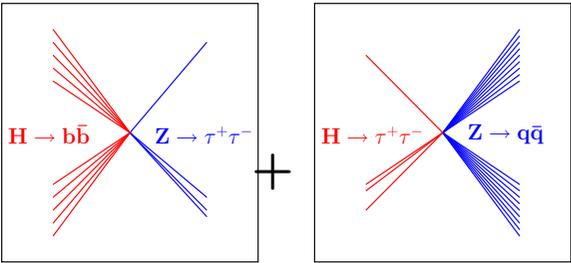
Die Schlüssel zum Erfolg

- Der Wirkungsquerschnitt bei LEP für $M_H = 115$ GeV und $\sqrt{s} = 208$ GeV ist ca. 0.1 pb. Das gibt nur etwa 50 Ereignisse pro Experiment.
- Die dominanten Zerfallskanäle des Higgs für $M_H = 115$ GeV sind $H \rightarrow b\bar{b}$ und $H \rightarrow \tau^+\tau^-$. **Nachweis von b quarks ist sehr wichtig.**
- Alle Zerfälle des Z-Bosons, auch $Z \rightarrow \nu\nu$, müssen analysiert werden. **Hermetizität ist wichtig.**
- Das Verhältnis Signal zu Untergrund bestimmt die Sensitivität. **Genauere Kenntnis eines möglichst kleinen Untergrunds ist wichtig.**

Wegen der geringen Statistik müssen die Resultate aller Kanäle und aller Experimente kombiniert werden.



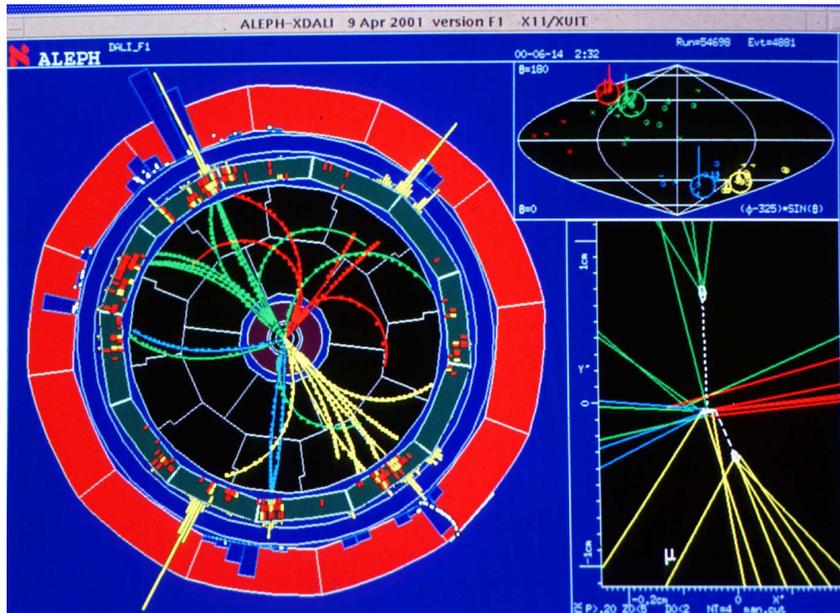
Higgs-Suche bei LEP - die verschiedenen Kanäle

Untersuchte Topologien	Anteil	Wichtigste Untergrundreaktionen
4-jets  $H \rightarrow b\bar{b}$ $Z \rightarrow q\bar{q}$	51%	$WW \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$, $ZZ \rightarrow bb\bar{q}\bar{q}$ und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$
Missing energy  $H \rightarrow b\bar{b}$ $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$	15%	$WW \rightarrow qq\bar{l}\nu$ und $ZZ \rightarrow bb\nu\nu$
Lepton Kanäle  $H \rightarrow b\bar{b}$ $Z \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$	4.9%	$ZZ \rightarrow b\bar{b}l\bar{l}$
Tau - Kanäle  $H \rightarrow b\bar{b}$ $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ + $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ $Z \rightarrow q\bar{q}$	4.9 + 5.1%	$WW \rightarrow qq\tau\nu$, $ZZ \rightarrow qq\tau\tau$ und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$
Summe $\approx 80\%$		



Higgs-Suche bei LEP - eine Evidenz?

Ein Kandidat



Die signifikantesten Kandidaten

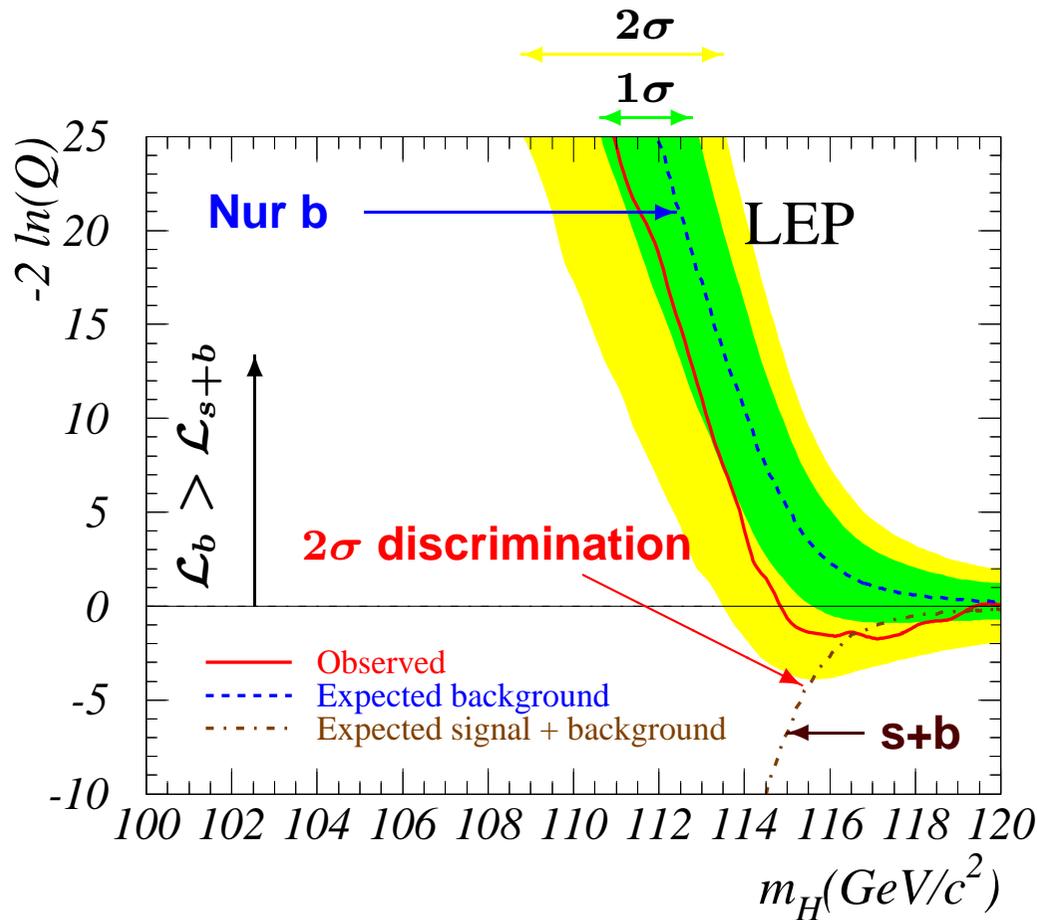
	4-jets	Emiss	lepton	tau	
A	6	-	1	1	8
D	3	-	-	-	3
L	2	2	-	-	4
O	1	1	-	-	2
	12	3	1	1	17

- Die Erwartung: 8.4 (signal) + 15.9 (background).
- Zusätzliche zu den Kandidaten fließen die Effizienz (30-60%) und der Untergrund mit ein.
- Die Kandidaten gehen mit Ihrer Signifikanz ein, $A / D / L / O = 5.6 / 0.7 / 1.2 / 0.7$.
- Die meisten Kandidaten sind 4-jets.
- Die meisten Kandidaten hat **ALEPH**.

Erst eine komplizierte Kombination aller Kanäle und Experimente liefert das LEP Resultat.



Higgs-Suche bei LEP - das Resultat



Der lange Weg...

- **Die Frage:** Sind die Daten besser verträglich mit Background (b) oder mit Signal = $f(M_H)$ und Background (s+b).
- **Das Mittel:** Likelihood ratio $Q = \mathcal{L}_{s+b} / \mathcal{L}_b$
- **Die Formel:**

$$-2 \ln Q = 2s_{\text{tot}} - 2 \sum_i n_i \ln [1 + s_i / b_i]$$

...zum amtlichen Endergebnis

- LEP Luminosität $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2.5 \text{ fb}^{-1}$
- $M_H > 114.1 \text{ GeV}$ mit **95% CL**.
- Im Bereich $115 \text{ GeV} < M_H < 118 \text{ GeV}$ ist $CL(s + b) = 37\%$ und $CL(b) = 8\%$.

Erst die Zukunft wird die Frage nach dem Higgs beantworten.



Der Proton - Antiproton Beschleuniger Tevatron

Ein paar Details

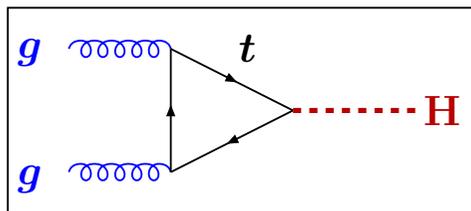
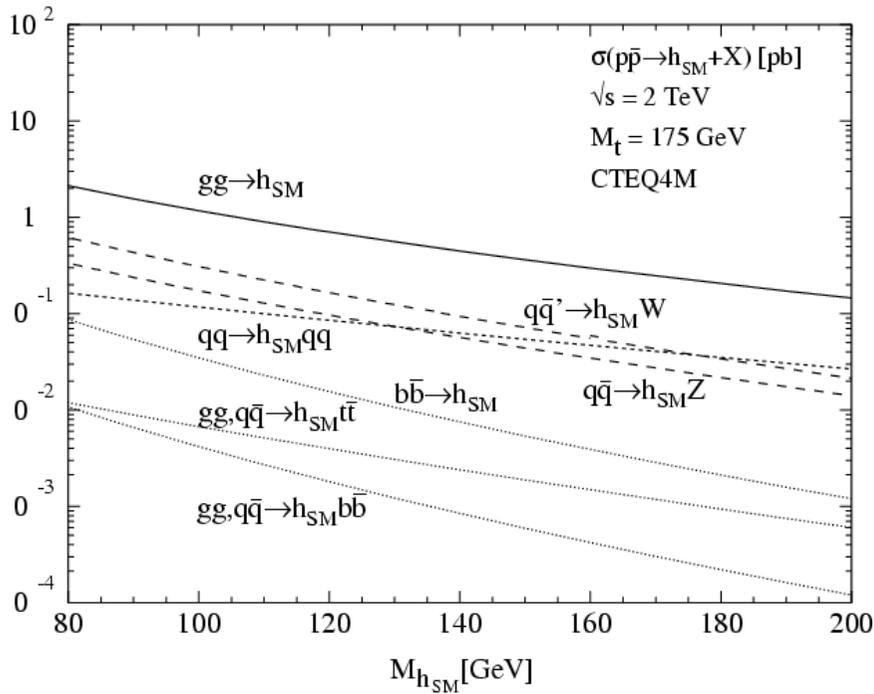


	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

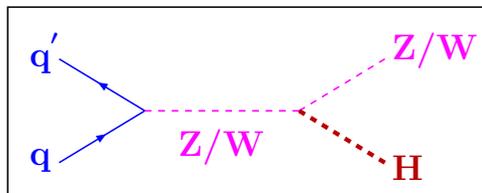
Das Tevatron wird im RUN II eine etwa 30 mal höhere Ereignisrate liefern.



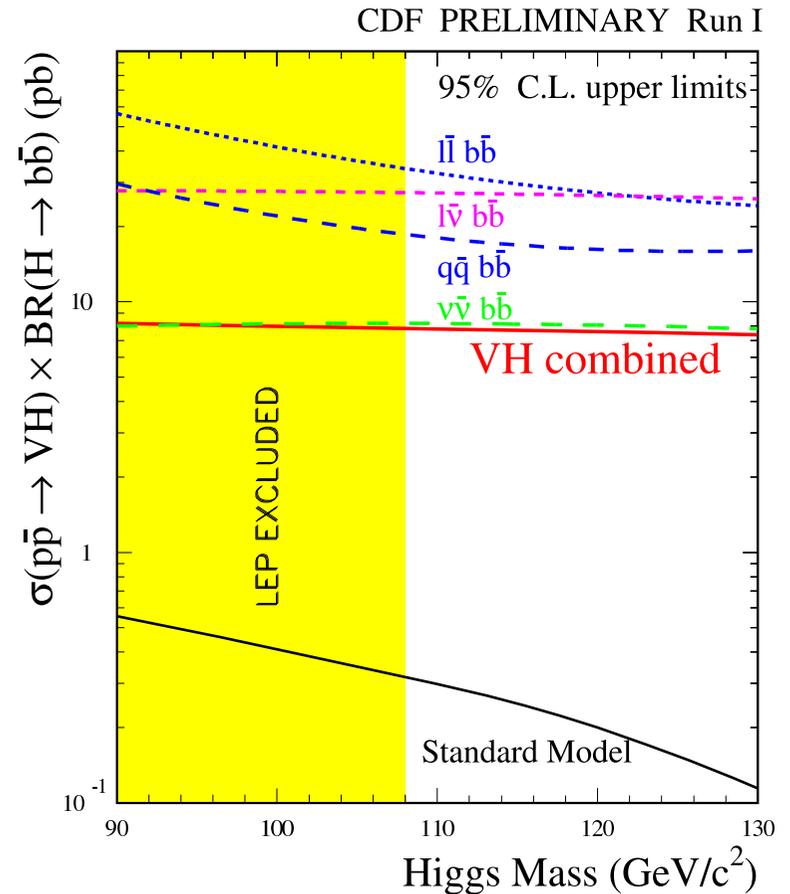
Higgs-Suche am Tevatron - die Vergangenheit



- ⊕ Größte Rate ca. 1pb.
- ⊖ Immenser Untergrund.



- ⊖ Faktor 2-5 kleinere Rate.
- ⊕ Lepton-Tag hilft den Untergrund zu bekämpfen.

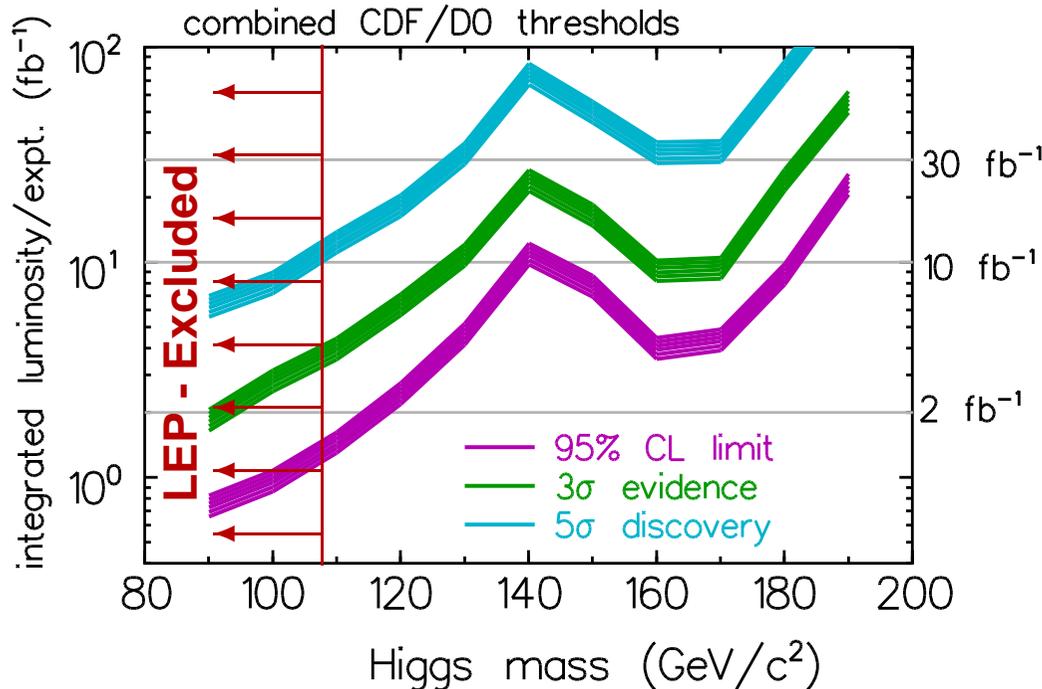


$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 0.11 \text{ fb}^{-1}$$

Die Sensitivität von RUN I reichte nicht aus um das Standardmodell zu testen.



Higgs-Suche am Tevatron - die Zukunft



Lumi Erwartungen

- 0.3 fb^{-1} bis Ende 2002.
- 2 fb^{-1} bis Ende 2004.
- 10 fb^{-1} bis zum Start von LHC.

Suchkanäle

- $114.1 \text{ GeV} < M_H < 135 \text{ GeV}$
 $qq' \rightarrow Z/W \rightarrow HZ/W$
- $M_H > 135 \text{ GeV}$
 $gg \rightarrow H \rightarrow WW^*$

Die Umfrage: Was kann im RUN II erreicht werden?

Realist: Eine Verbesserung gegenüber LEP ist ab ca. 2 fb^{-1} Luminosität möglich.

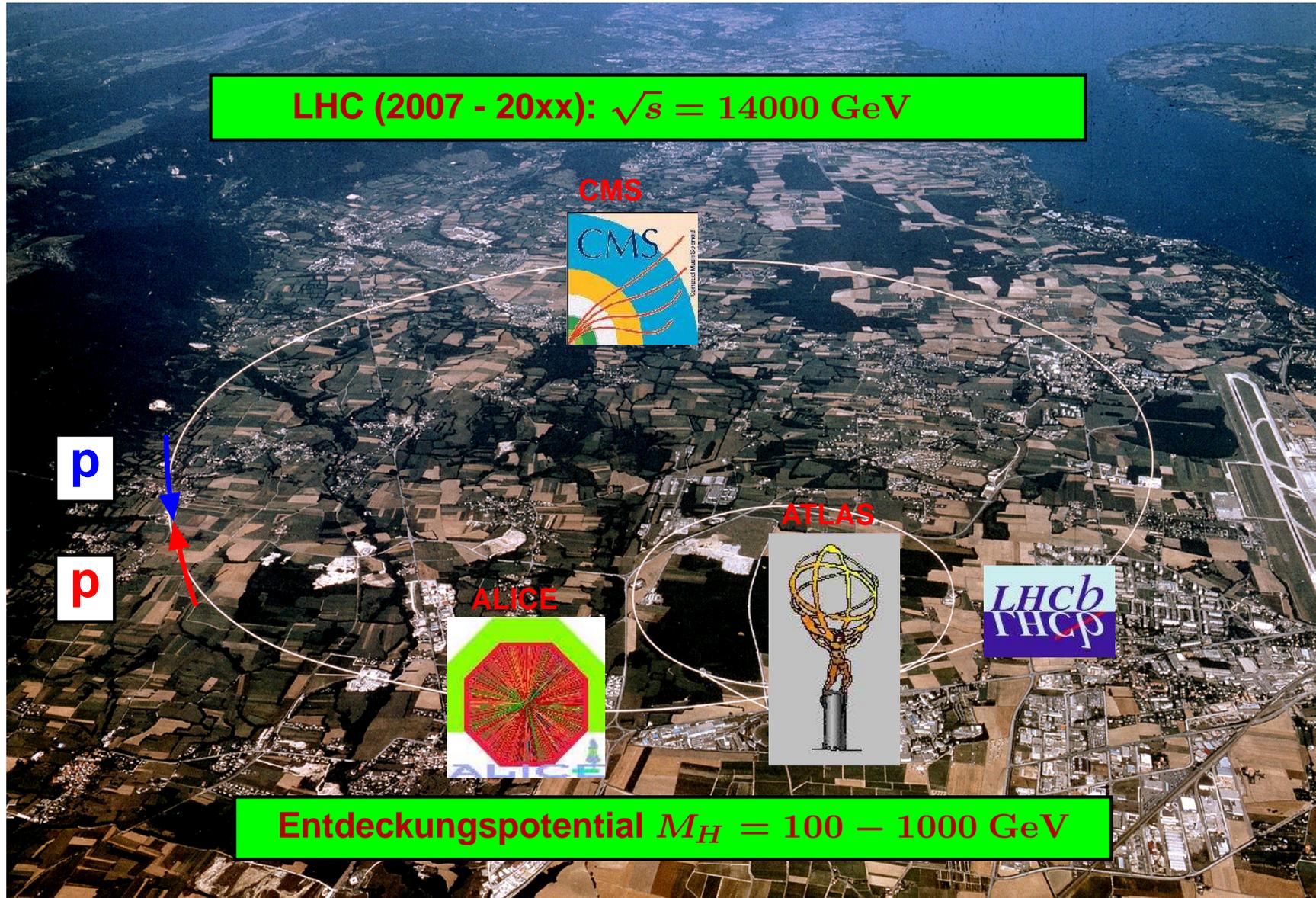
Pessimist: Mit 10 fb^{-1} werden Massen bis $M_H = 180 \text{ GeV}$ mit 95% CL ausgeschlossen.

Optimist: Für $M_H = 116 \text{ GeV}$ und 15 fb^{-1} ist eine 5 Sigma Entdeckung möglich.

Alles ist möglich, wir werden warten müssen. Und um sicher zu gehen ...



Der Large Hadron Collider (LHC)





Der LHC - ein Proton-Proton Beschleuniger (2007⁺⁺)

Alice

Schwere Kerne

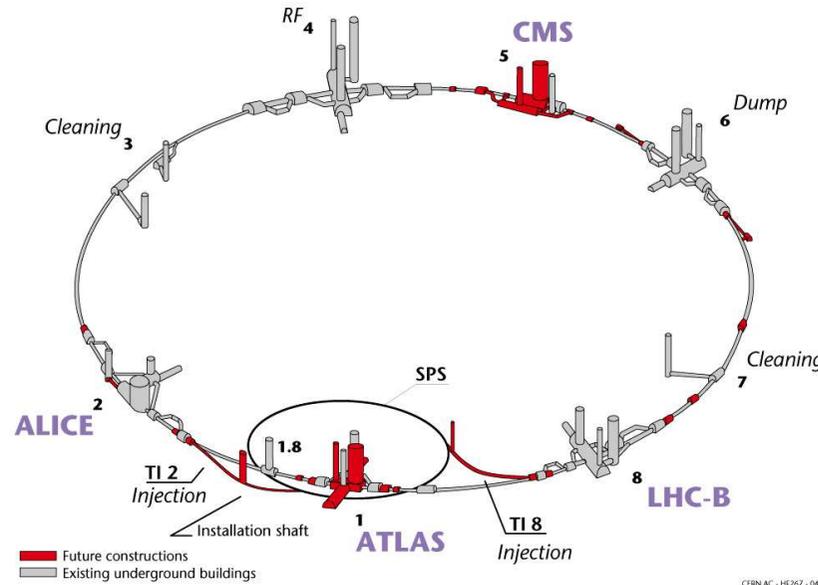
LHC-B

Materie ↔ Antimaterie

ATLAS / CMS

Higgs Produktion

**Das Herzstück des LHC
die supraleitenden Magnete**



Technische Daten

$L = 26.7 \text{ km}$

$E_p = 7 \text{ TeV}$

$N_p = 1.1 \cdot 10^{11} / \text{Strahl}$

Lumi Erwartungen

$10 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$ beim Start

$100 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$ nominal



Länge	15 m
Gewicht	23.8 t
B-Feld	8.3 T
Temperatur	1.9 K
Strom	12000 A
Energie	7.1 MJ



Bauarbeiten für ATLAS - die Schächte

Der Bauplan: Man nehme viel Platz,



grabe zwei tiefe Löcher...



Ein paar Daten

- Durchmesser: 12.6 und 18 m
- Tiefe: 60 m (Augsburger Dom)
- Baubeginn: 1998, während LEP läuft !
- Fertigstellung: 2002



Bauarbeiten für ATLAS - die Kaverne

...bringe schweres Gerät hinunter



Point 1 - Excavation of USA 15 - March 08, 2000 - CERN ST-CE

und schachte eine große Kaverne aus.



Point 1 - UX15 cavern - General view - May 24, 2002 - CERN ST-CE

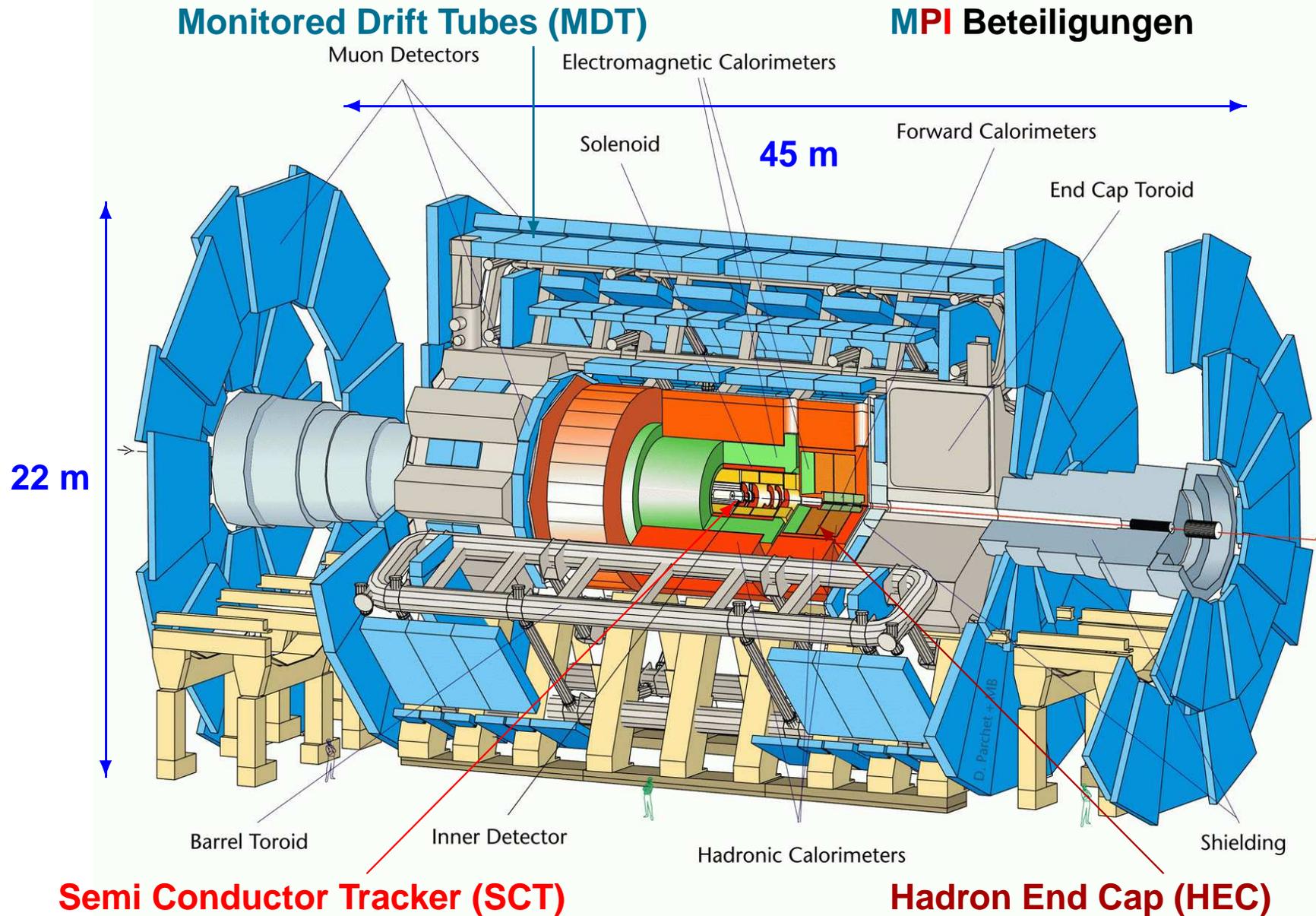
Ein paar Schwierigkeiten auf dem Weg

- Durch das fehlende Gestein der Schächte hebt sich der LEP Ring lokal um etwa 4 cm.
- Damit der Ring nicht bricht muß der Beschleuniger nachjustiert werden.
- Kaverne: LxBxH = 53x30x35 m (LxB = Doppeltornhalle, H = Augsburger Rathaus).



Der ATLAS Detektor

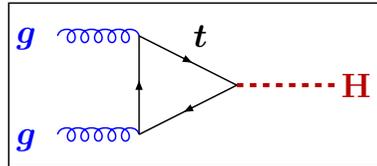
0712/mb-26/06/97



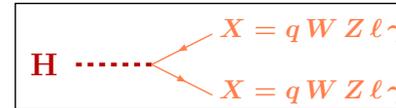


Higgs-Suche bei LHC

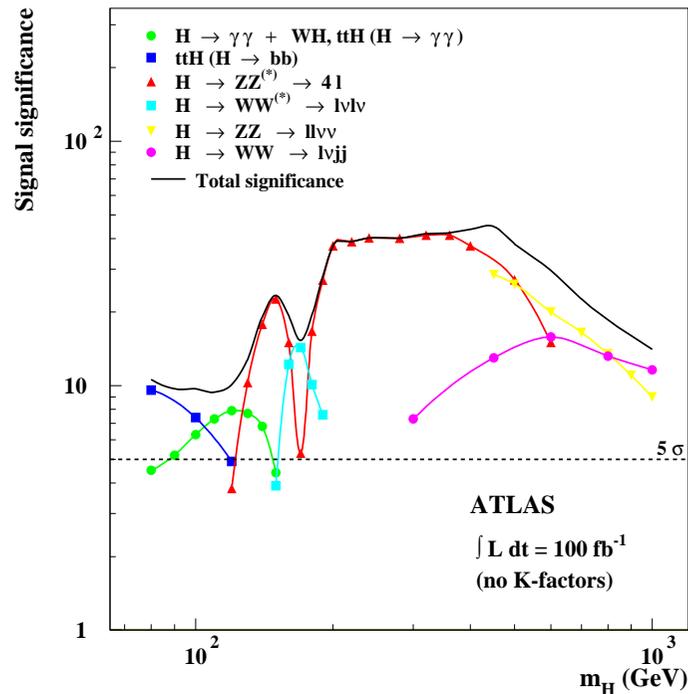
Die dominanten Produktions-



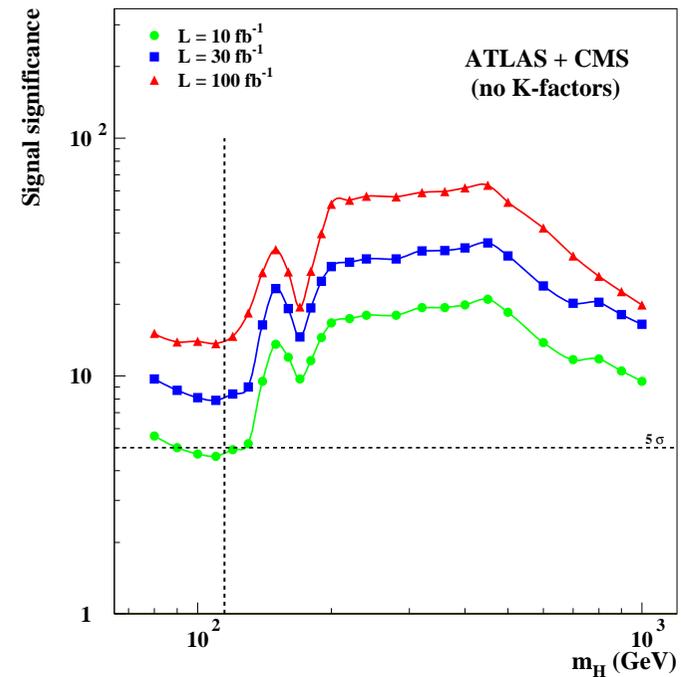
und Zerfallskanäle



am LHC und Tevatron sind gleich.



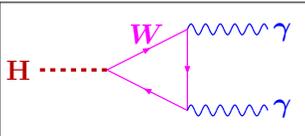
Im favorisierten Massenbereich sind $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow b\bar{b}$ wichtig.

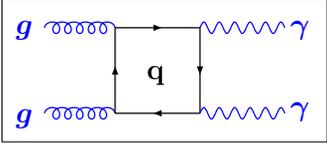
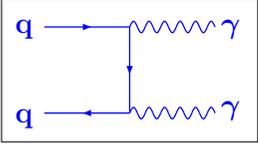
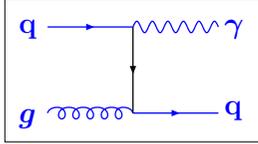


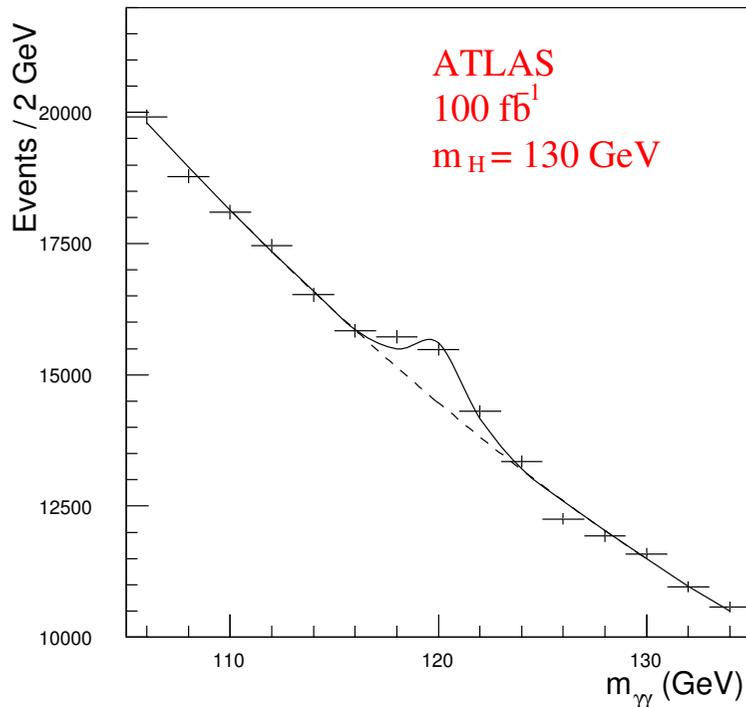
Die kombinierte Sensitivität ist im ganzen Massenbereich besser als 5σ .



Ein Beispiel - der Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Im Bereich $80 \text{ GeV} < M_H < 150 \text{ GeV}$ ist der Kanal  sehr aussichtsreich.

Untergrund sind   und  mit $q \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$.



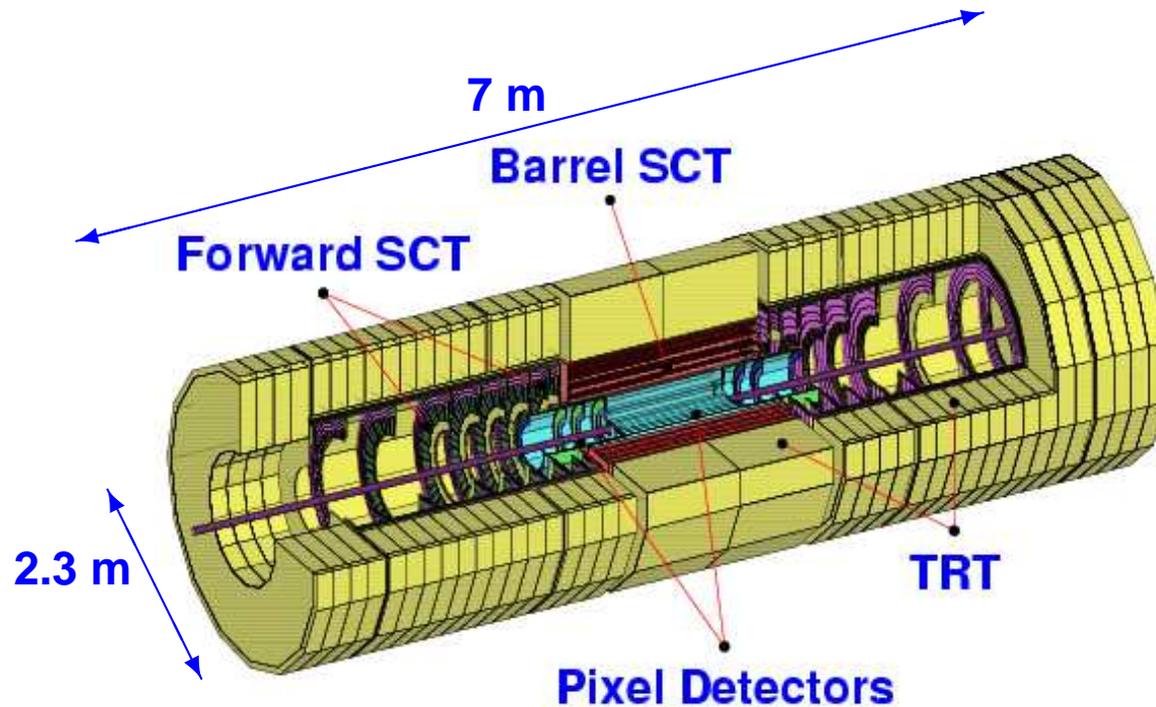
Die Aussichten

- Die Rate ist sehr klein aber die Ereignisse sind sehr klar.
- Die Analyse erfordert ein extrem präzises elektromagnetisches Kalorimeter um γ von $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ zu unterscheiden.

Mit einem Jahr nomineller Luminosität ist eine Entdeckung mit 4σ möglich.



Der innere Spurdetektor von ATLAS



Die Silizium Detektoren

Der Pixel Detektor

- Radius 4.8 – 16 cm
- 3 Lagen, 8 Scheiben
- $1.4 \cdot 10^8$ Auslesekanäle

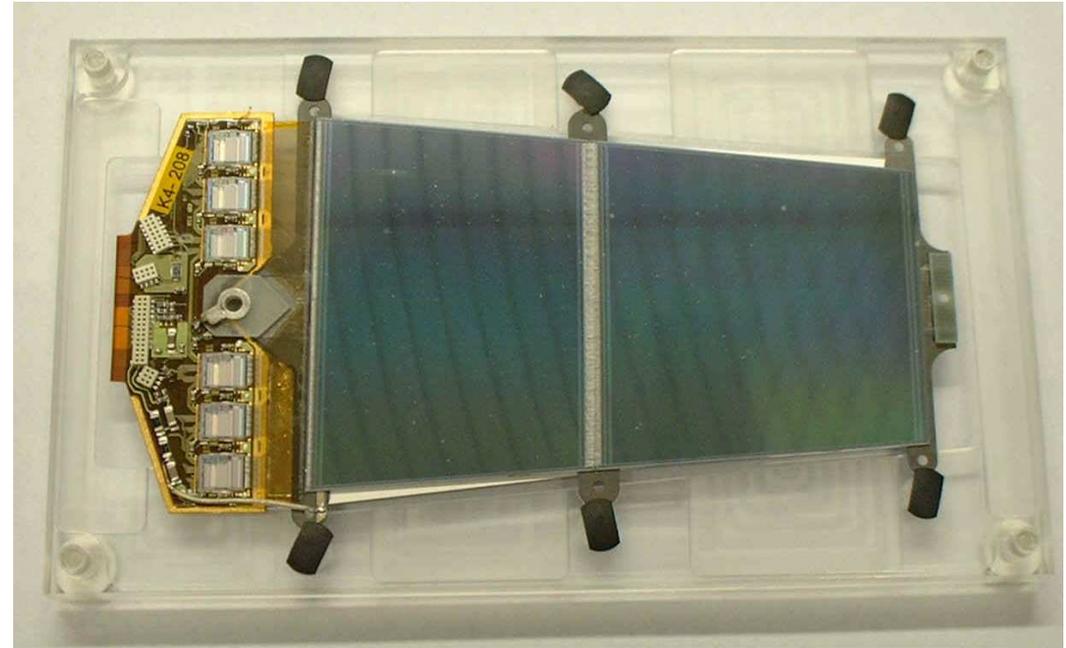
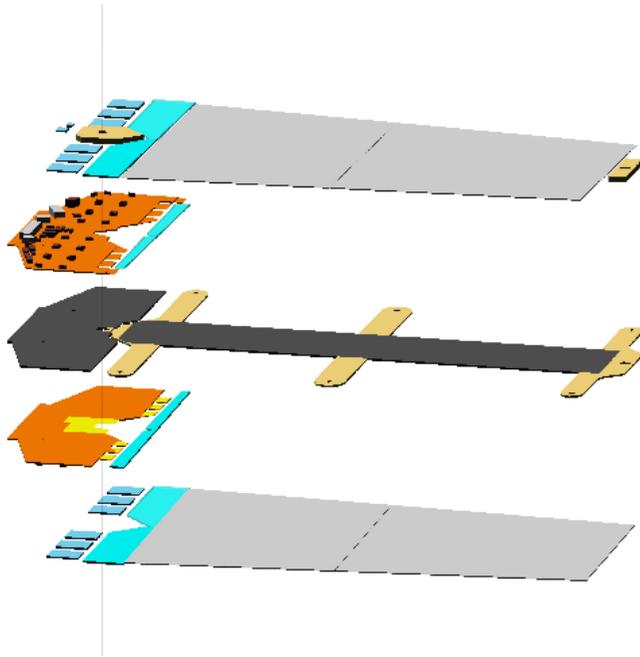
Der SemiConductor Tracker

- Radius 27 – 52 cm
- 4 Lagen, 18 Scheiben
- $6.3 \cdot 10^6$ Auslesekanäle
- 4088 Module, 61 m² Silizium

Das MPI baut 400 Module des SCT Vorwärtsbereichs.

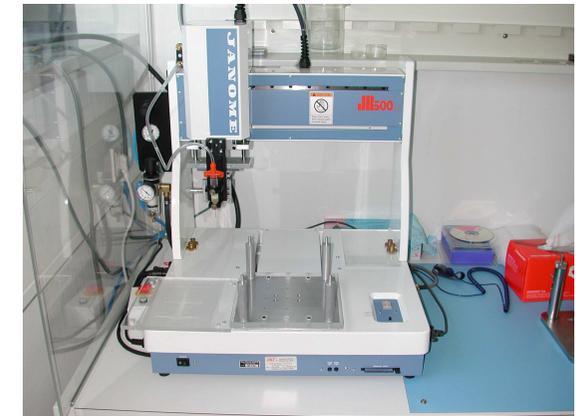


Vom Modell zur Realisation ist ein langer



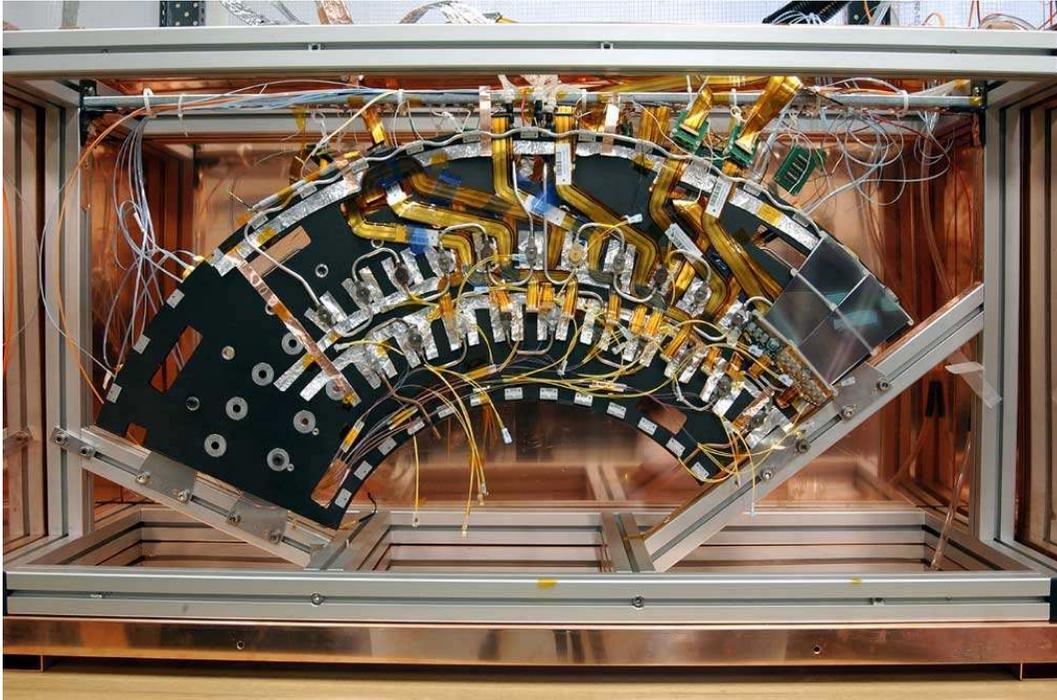
Die wichtigsten Dinge sind

- ein Roboter zum Ausrichten der Detektoren mit einer Genauigkeit von besser als $5 \mu\text{m}$,
- ein Kleberoboter,



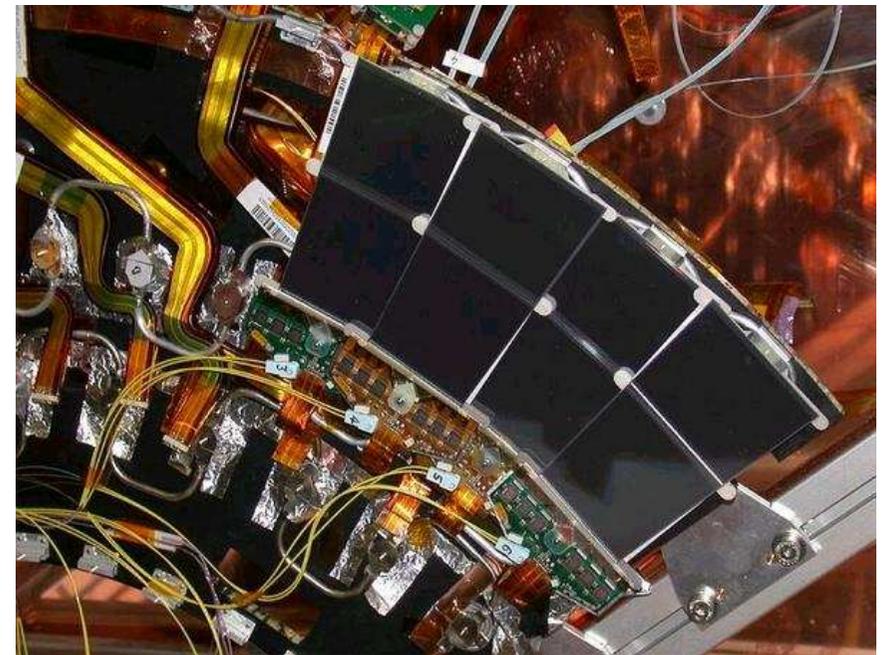


Der Test eines Teilsystems



Die Integration der Module ist diffizil

- Die Module sind sehr empfindlich.
- Eine präzise Vermessung ist nötig (X-Ray).
- Elektronisches Rauschen ist zu vermeiden.
- Es ist nicht viel Platz, die Module überlappen.

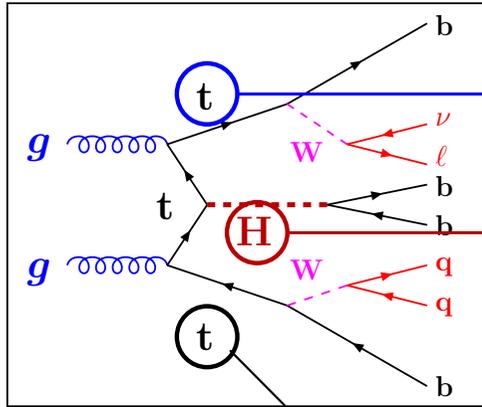


Beim Zusammenspiel aller Kräfte ist sehr viel Abstimmung nötig.



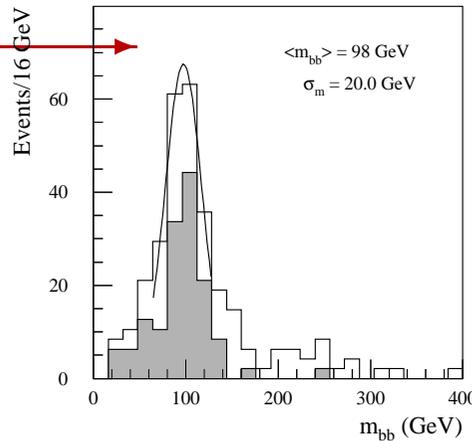
Ein Beispiel - der Kanal Htt

Der Prozess

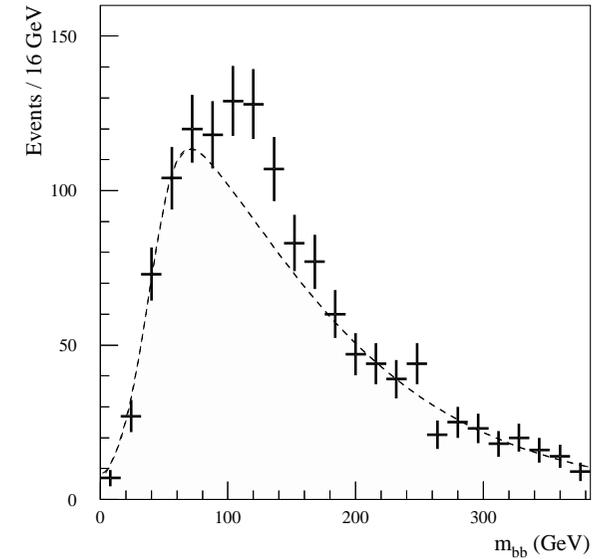


Rekonstruktion

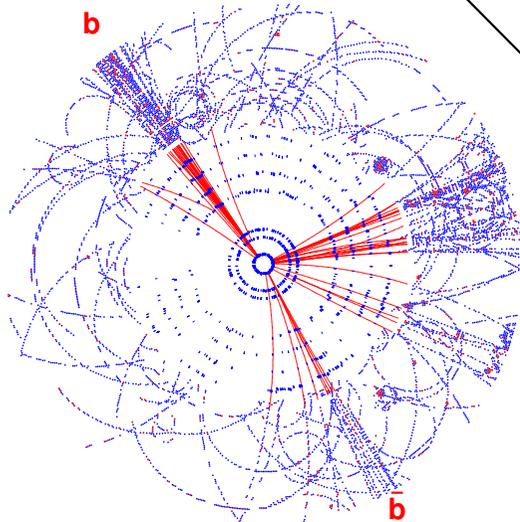
- $t \rightarrow bl\nu$
 $m = (174 \pm 9) \text{ GeV}$



Was können wir erreichen



Ein Ereignis



- $t \rightarrow bqq$
 $m = (174 \pm 12) \text{ GeV}$

- Für $M_H = 120 \text{ GeV}$ und $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ fb}^{-1}$ kann die top-Higgs Kopplung mit einer Genauigkeit von etwa 15% bestimmt werden.

Ein viel versprechender Kanal für leichte Higgs-Bosonen.

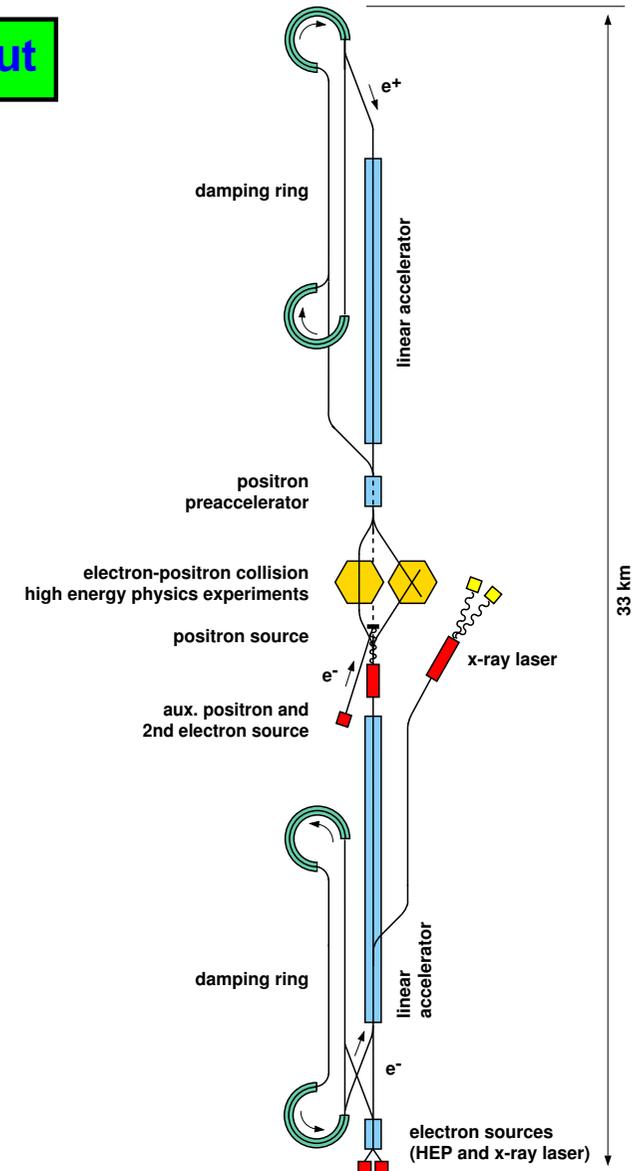


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



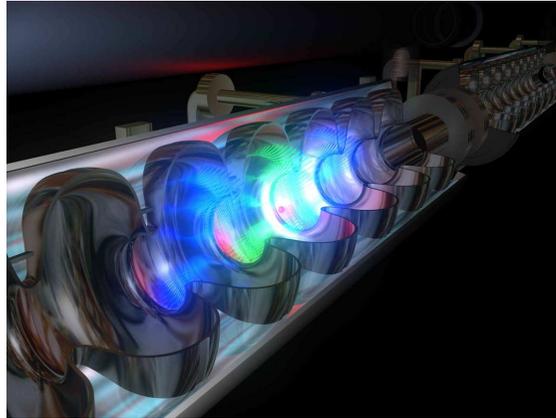
Technische Daten

Länge	33 km
Gradient	23.4 MV/m
E_e	250 GeV
N_e	$2 \cdot 10^{10}$ /Paket
N_{Paket}	2820
Kavitäten	21000
Luminosität	$3.4 \cdot 10^{34}$ /cm ² s

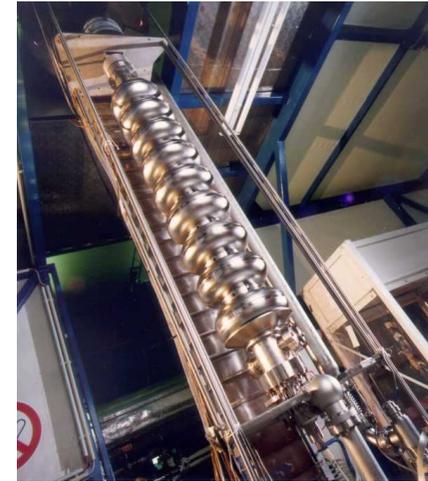


Das TESLA Projekt - die Entwicklungsarbeiten

Es ist ein langer Weg von der Prinzipskizze



über die Kavität



und die Tesla Test Facility



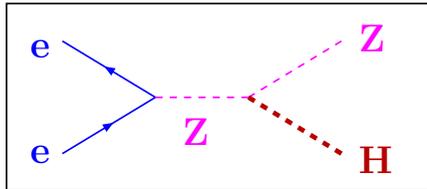
zum endgültigen Beschleuniger.

Die Bauzeit, gerechnet ab dem Tag X, beträgt 8 Jahre.

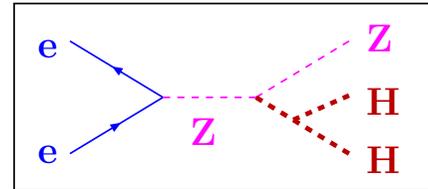


Beispiele für Messungen am Linearbeschleuniger

Die Massenbestimmung

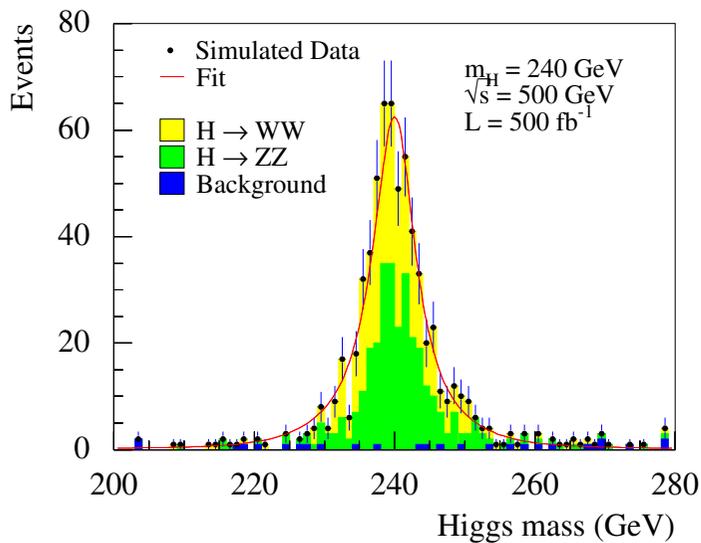


Die Higgs Selbstwechselwirkung

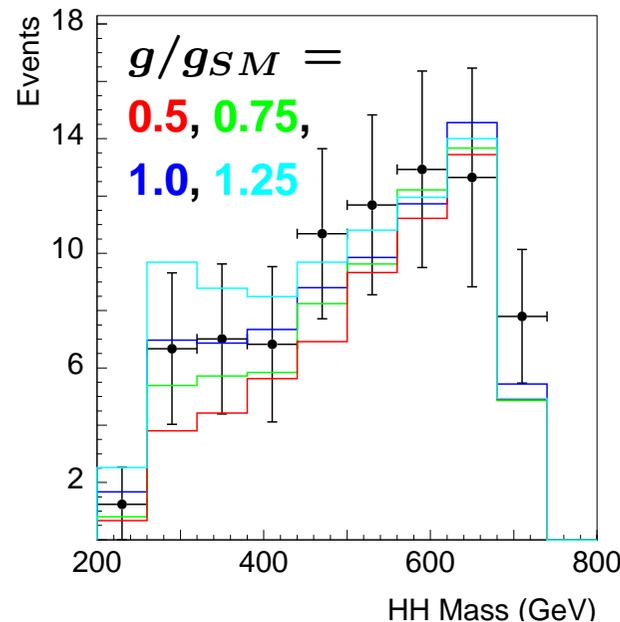


Kopplung:

$$g_{HHH} = \frac{3M_H}{2v}$$



Auflösung: $\frac{\Delta m}{m} = 0.08\%$



$$M_H = 120 \text{ GeV}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 1000 \text{ fb}^{-1}$$

$$\sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$$

↓

$$\frac{\Delta g}{g} = 30\%$$

Am Linearbeschleuniger werden sehr präzise Messungen möglich sein.



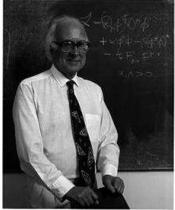
Zusammenfassung und ...

- Das Higgs-Boson ist der aussichtreichste Kandidat um die fundamentalen Probleme des Standardmodells zu lösen.
- Die bisherigen Suchen waren erfolglos und liefern eine untere Massengrenze von $M_H > 114.1 \text{ GeV}$.
- Aus theoretischen Überlegungen und Einschränkungen durch Präzisionsmessungen des Standardmodells folgt mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass das Higgs-Boson leicht ist, $M_H < \mathcal{O}(200) \text{ GeV}$.
- Mit etwas Glück wird das Higgs-Boson am Tevatron gefunden werden.
- Das Entdeckungspotential des LHC ist so groß, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit entweder das Higgs-Boson oder ein anderer Mechanismus zur Massenerzeugung gefunden wird.
- Sollte das Higgs-Boson existieren, wird ein zukünftiger Linearbeschleuniger seine Eigenschaften präzise vermessen.

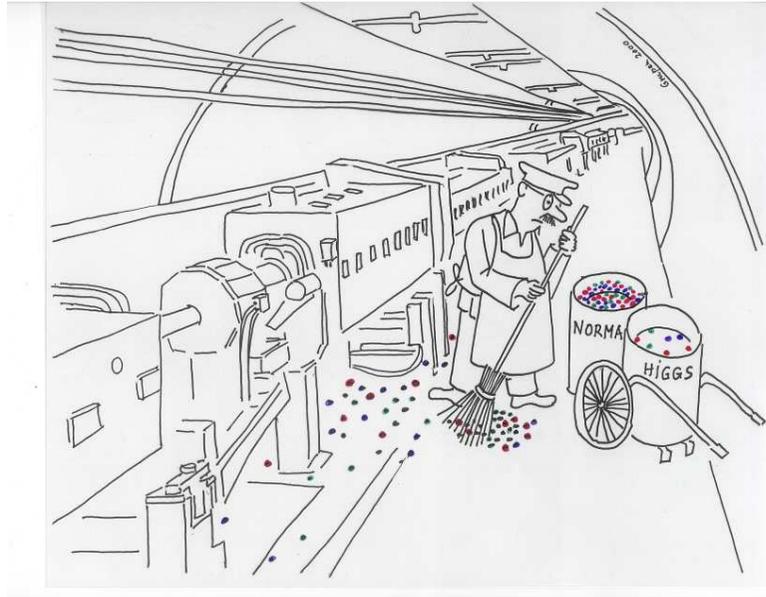
Was immer passieren wird, es ist sehr wahrscheinlich, dass wir in 10-15 Jahren wissen, was für die Massenerzeugung verantwortlich ist.



...Ausblick



Was so begann,



nahm so

seinen Lauf, und endet

H⁰ § $J^{PC} = 0^{++}$

Charge = 0

Mass $m = 120.3 \pm 0.1 \text{ GeV}$ [a]

Full width $\Gamma = 2.20 \pm 0.18 \text{ MeV}$ [b]

H ⁰ DECAY MODES	FRACTION	CL
$b\bar{b}$	$(66.3 \pm 1.9)\%$	95%
WW	$(13.5 \pm 3.4)\%$	95%
$\gamma\gamma$	$(0.21 \pm 0.09)\%$	95%

hoffentlich so.

§ Particle Data Group,
Eur. Phys. J. C66, 20xx.